中国生态农业学报 2016 年 8 月 第 24 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2016, 24(8): 1095−1102

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160256

播期、播量对旱作小麦'小偃 60'生长发育、产量及水分利用的影响*

张明明[1,2] 董宝娣[1] 乔匀周[1] 赵 欢[1,2] 刘孟雨[1**]
陈骎骎[1] 杨 红[1,2] 郑 鑫[1,2]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省节水农业重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 在旱作条件下，探讨播期及播量对小麦新品系'小偃 60'群体性状、产量及水分利用的影响，可为小麦适雨栽培提供技术依据。试验于 2014—2015 年在中国科学院南皮生态农业试验站进行，自 10 月 15 日至 11 月 14 日，每 6 d 设置一个播期，共设 6 个播期(T1~T6)，设播量不变(B1)和逐期增加播量(B2)两个处理：B1 为 300 kg·hm^{-2}，T1 到 T6 播量相同；B2 为随播期推迟播量逐期增加，每推迟 1 d 增加 7.5 kg·hm^{-2}，各播期的播量分别为 300 kg·hm^{-2} (T1)、345 kg·hm^{-2} (T2)、390 kg·hm^{-2} (T3)、435 kg·hm^{-2} (T4)、480 kg·hm^{-2} (T5)和 525 kg·hm^{-2} (T6)，研究了不同播期和播量下'小偃 60'群体性状、产量及水分利用的变化规律。试验结果表明：1)随播期推迟，出苗时间延长、生育期推迟，全生育缩短；播量对生育期无显著影响。2)随播期推迟，出苗率和单株成穗数逐渐降低；播量增加，基本苗及穗数提高。3)随播期推迟，株高和生物量降低；播量增加，生物量提高，株高无显著变化。4)随播期推迟，籽粒产量下降；逐期增加播量后，11 月 2 日前籽粒产量可达 6 600 kg·hm^{-2} 以上且无显著差异。5)若随播期推迟增加播量，前 4 个播期产量、水分利用效率无显著变化，皆达 29 kg·hm^{-2}·mm^{-1} 以上。研究结果表明，'小偃 60'是一个播期宽泛的品种，随播期推迟产量下降，但在一定播期范围内通过增加播量，提高群体(穗数)，可以获得与适时播种相近的产量，播量与播期推迟天数的理论关系为 y=0.368 2x^2+1.193 9x+316.7 (R^2=0.983 9)。

关键词 冬小麦 小偃 60 播期 播量 产量 水分利用效率
中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)08-1095-08

Effects of sowing date and seeding density on growth, yield and water use efficiency of 'Xiaoyan 60' wheat under rainfed condition*

ZHANG Mingming[1,2], DONG Baodi[1], QIAO Yunzhou[1], ZHAO Huan[1,2], LIU Mengyu[1**], CHEN Qinqin[1], YANG Hong[1,2], ZHENG Xin[1,2]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-saving Agriculture / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Using drought resistant and high-yielding crop varieties is critical for high and stable crop productivity under rainfed farming condition. In this study, an experiment was conducted at Nanpi Eco-Agricultural Experimental Station of

* 国家科技支撑计划项目(2013BAD05B02, 2012BAD08B02)和河北省科技计划项目(14226403D, 15226407D)资助
** 通讯作者：刘孟雨，主要从事作物高效用水生理生态基础和农业节水调控与技术等方面研究。E-mail: mengyuliu@sjziam.ac.cn
张明明，研究方向为作物高效用水生理。E-mail: zhangmingming13@mails.ucas.ac.cn
收稿日期：2016−03−22 接受日期：2016−04−25

* This research was supported by the National Key Technologies R&T Program of China (2013BAD05B02, 2012BAD08B02) and Key Technology Support Program of Hebei Province (14226403D, 15226407D).
** Corresponding author, E-mail: mengyuliu@sjziam.ac.cn
Received Mar. 22, 2016; accepted Apr. 25, 2016

Chinese Academy of Sciences (116°40′E, 38°00′N) in 2014–2015 to investigate the performance of 'Xiaoyan 60' wheat cultivar under the rainfed condition. The objective of the study was to test the adaptability of 'Xiaoyan 60' wheat cultivar to late sowing and yield loss compensation by increased seeding rate. Treatments included two factors, sowing date and seeding density. Six sowing dates were set, which were from the 15th of October to the 14th of November with six days interval, and denoted as T1, T2, T3, T4, T5 and T6, respectively. Then there were two treatments of seeding densities — constant seeding rate (B1) and increased seeding rates with delayed sowing date (B2). In B1, sowing density was 300 kg·hm^{-2} for all sowing dates, whereas in B2, it started at 300 kg·hm^{-2} and progressively increased at 7.5 kg·hm^{-2}·day^{-1} with delayed sowing date. Thus the sowing densities at sowing dates in B2 treatments were 300 kg·hm^{-2} for T1, 345 kg·hm^{-2} for T2, 390 kg·hm^{-2} for T3, 435 kg·hm^{-2} for T4, 480 kg·hm^{-2} for T5 and 525 kg·hm^{-2} for T6. The population properties, growth, yield and water use characteristics were investigated under different treatments. The results showed that the plant population traits, yield and water use efficiency varied with sowing date and seeding density. The growth period shortened with delayed sowing date, the duration for all the growth stages was also shortened. In contrast, seeding rate had no effect on growth period, but positively influenced the number of seedlings, number of spikes and dry biomass amount. Also plant height was not affected by seeding density. Delayed sowing gradually decreased the rate of seedling emergence, number of spikes per plant, plant height and dry biomass. Similarly, grain yield decreased with delayed sowing. However, the grain yield reached 6 600 kg·hm^{-2} level through increase seeding density to compensate for delayed sowing. There was no significant difference among the first four sowing dates (from T1 to T4) for grain-yield-based water use efficiency, which was above 29 kg·hm^{-2}·mm^{-1}. Because 'Xiaoyan 60' wheat cultivar was strongly adaptable to late sowing, it was recommended for cultivation under the rainfed farming conditions. Yield loss due to delayed sowing was compensated for by increasing seeding rate, which ensured optimum plant population. The correlation between seeding density (y) and delayed days (x) of sowing could be decribed by the regression equation $y = 0.368\ 2x^2 + 1.193\ 9x + 316.7$ ($R^2 = 0.98$).

Keywords Winter wheat; 'Xiaoyan 60'; Sowing date; Sowing density; Wheat yield; Water use efficiency

河北省环渤海地区淡水资源严重匮乏及土壤盐碱制约农业的发展，水资源的短缺，使作物生产中更为有效地利用水资源变得尤为重要[1]。华北平原是我国重要的粮食产区，小麦产量占全国小麦产量的26%[2]，然而，在冬小麦生长期间，华北平原年平均降水量约为 120 mm，远低于冬小麦耗水总量[3]。由于气候变暖(影响小麦冬前发育)、秋季低温寡照(推迟玉米熟期)等自然原因，小麦播期有推迟的趋势，调节播期可以延缓小麦越冬前的发育进程，避免冬季小麦植株徒长、苗情过旺，降低了冻害的几率，并由此影响小麦的产量和品质[4–5]。因此，在旱作条件下，如何充分利用 10 月至 11 月上旬的降雨实现小麦播种，对提高降水的有效利用及小麦丰产具有重要意义。

适宜的播期播量是小麦高产的关键栽培技术，直接影响小麦群体质量和小麦产量[6–8]。师学珍等[9]研究发现种植密度对各生育时期群体分蘖数均有影响，播期早，种植密度在整个生育期的群体总茎数差异较小，播种晚，差异大。李豪圣等[6]研究发现，密度对产量及 3 个产量构成因素的影响均达显著水平。已有研究表明，播期对冬小麦单位面积穗数、千粒重及产量产生显著的影响，对穗粒数有一定调节作用，在一定范围内，单位面积穗数随着播期的推迟而减少，穗粒数随播期的推迟而增加，千粒重随播期的推迟先增加后下降[6,10–11]。Sun 等[12]在播期对冬小麦的影响研究中得出，在华北平原，10 月 10 日前播种的小麦产量相近，此后，随播期延迟，小麦产量显著降低。播期还可以影响小麦生育进程和群体性状，随着播种期的推迟小麦全生育期缩短，但缩短天数少于播期推迟天数[7]。

'小偃 60'是李振声院士从'小偃 54'和'鲁麦 13'的杂交组合中鉴定筛选出的新品系，对比'京 9428'、'石 4185'、'冀麦 32'均有不同程度增产[13]，具有耐盐、抗逆、高产的良好品质，适合在盐碱地生长。大面积推广'小偃 60'需要配套的高产节水栽培技术。旱作条件下'小偃 60'的适宜播期、不同播期下最佳播量及植株生长发育特性、产量形成及对水分的高效利用等少见报道。本研究探讨旱作条件下，播期及播量对'小偃 60'群体性状、产量及水分利用的影响，以期为抗旱'小偃 60'适雨栽培及推广应用提供理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2014—2015年在中国科学院南皮生态农业试验站(116°40′E, 38°00′N，海拔 11 m)进行，该地属暖温带半湿润季风气候，年均降水量 480 mm，年均气温 12.3 ℃，年日照总时数 2 938.6 h，年总辐射量 133.6 kJ·cm^{-2}。土壤为脱盐潮土，有部分盐土，浅层

地下水为咸水和微咸水, 代表了环渤海低平原缺水盐渍化类型。土壤耕层(0~30 cm)速效氮 44.79 mg·kg^{-1}, 速效磷 4.94 mg·kg^{-1}, 速效钾 149.97 mg·kg^{-1}, 平均容重 1.40 g·cm^{-3}。

表 1 为 2014—2015 年冬小麦生长季气象数据, 平均气温 9.4 ℃, 为正常年(2011—2015 年小麦生育期平均气温为 9.3 ℃)。采用国内较常用的降水年型划分标准[14]划分降水年型, 试验区域近 20 年(1996—2015 年)小麦生育期间年均降水量为 125.2 mm, 2014—2015 年降水量接近年均降水量, 属于平水年。

表 1　2014—2015 年试验区冬小麦生长季气象数据

Table 1　Weather data during the winter wheat growing season in 2014–2015 in the study area

月份 Month	10	11	12	1	2	3	4	5	6
降水量 Precipitation (mm)	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	53.2	37.0	1.8
温度 Temperature (℃)	14.8	6.6	–1.2	–0.8	1.2	7.9	13.1	20.5	25.0

低于 5 mm 的无效降水计入耗水量计算, 10 月份降水与温度为播种到 10 月 31 日数值, 6 月份降水与温度为 6 月 1 日到收获时数值。Invalid rainfall of less than 5 mm was recorded in water consumption calculation. Precipitation and temperature in October were the mean from sown to October 31. Precipitation and temperature in June were the mean from June 1 to the harvest day.

1.2　试验设计

试验设计播期和播量两个因素。播期为 6 个水平: T1, 10 月 15 日播种; T2, 10 月 21 日播种; T3, 10 月 27 日播种; T4, 11 月 2 日播种; T5, 11 月 8 日播种; T6, 11 月 14 日播种。设播量不变(B1)和逐期增加播量(B2)两个处理: B1 为 300 kg·hm^{-2}, T1 到 T6 播量相同; B2 为随播期推迟播量逐期增加, 每推迟 1 d 增加 7.5 kg·hm^{-2}, 各播期的播量分别为 300 kg·hm^{-2} (T1)、345 kg·hm^{-2} (T2)、390 kg·hm^{-2} (T3)、435 kg·hm^{-2} (T4)、480 kg·hm^{-2} (T5)和 525 kg·hm^{-2} (T6)。小区面积 3.3 m×3.5 m=11.55 m^2, 每处理 4 次重复, 种植行距为 15 cm, 底肥为 202 kg·hm^{-2}(N)和 172.5 kg·hm^{-2} (P_2O_5), 春季追肥 135 kg·hm^{-2}(N), 田间管理同当地大田。

1.3　测定内容及方法

1.3.1　土壤体积含水量

播种及收获时用烘干法测定每处理 0~200 cm 土壤含水量, 0~20 cm 处每 10 cm 测一次, 20~200 cm 处每 20 cm 测一次。土壤重量含水量 θ(%)=100×(湿土重–干土重)/干土重。水层厚度与含水量的换算公式为: $Q=dh\theta$。式中, Q 为某土层含水量(mm), d 为土壤的干容重(g·cm^{-3}), h 为土层厚度(mm), θ 为土壤重量含水量。

1.3.2　生育期调查

记载小麦进入出苗期、返青期、拔节期、抽穗期、开花期、成熟期日期。

1.3.3　小麦茎蘖数量的测定

从测定小麦的基本苗开始, 在 1 m 双行的固定面积内, 定期测定小麦茎蘖数量的变化。

1.3.4　小麦光合参数测定

在冬小麦灌浆期(5 月 15 日)于晴朗无风的上午 9:00—11:00, 不同处理各选 3 株小麦, 选择完整无病的旗叶, 采用美国基因公司生产的 Li-Cor6400 便携式光合仪进行光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)等光合参数测定。

1.3.5　小麦产量和考种

小麦成熟时(6 月 6 日)收获, 每小区随机选择 20 穗小麦室内考种获得株高、穗长、穗粒数、千粒重等指标, 每小区取 1 m 双行脱粒风干后测定总生物量和经济产量, 计算收获指数。

1.3.6　计算公式

采用土壤水量平衡方程计算蒸散量, 计算公式为:

$$\mathrm{ET}=P+I-R-D-\Delta W \tag{1}$$

式中: ET 为蒸散量, P 为降雨量(可通过该站气象观测场直接获得), I 为灌溉量(本试验为 0), R 为地表径流量, D 为深层渗漏量, ΔW 为一段时间内土壤蓄存水变化量。本试验地区地表径流和深层渗漏很小, 可忽略不计。这样, 在一定时间内, 总耗水量可近似地认为由降水量和土壤含水量的变化量决定, 故水量平衡方程可近似写为:

$$\mathrm{ET}=P-\Delta W \tag{2}$$

群体水分利用效率($\mathrm{WUE_{bm}}$)计算公式为:

$$\mathrm{WUE_{bm}}=\mathrm{BM/ET} \tag{3}$$

式中: BM 为总的干物质积累量, ET 为总的蒸散量。

产量水分利用效率($\mathrm{WUE_y}$)计算公式为:

$$\mathrm{WUE_y}=Y/\mathrm{ET} \tag{4}$$

式中: Y 为产量, ET 为总的蒸散量。

叶片水分利用效率($\mathrm{WUE_{leaf}}$)计算公式为:

$$\mathrm{WUE_{leaf}}=P_n/T_r \tag{5}$$

式中: P_n 为光合速率, T_r 为蒸腾速率。

收获指数(HI)计算公式为:

$$\mathrm{HI}=Y/\mathrm{BM} \tag{6}$$

式中, Y 为产量, BM 为总的干物质积累量。

1.4　数据处理

以 Microsoft Excel 2007 绘制图表, 采用 Microsoft

Excel 2007、IBM SPSS Statistics 20 数据分析软件对试验数据进行统计分析，各处理的比较采用最小显著差数(LSD)法(α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同播期播量小麦植株生育进程的变化

随着播期的推迟，播种至出苗天数逐渐增加，10 月 15 日播种冬小麦‘小偃 60’出苗所需时间为 7 d，而 10 月 21 日播种所需时间为 10 d，其后出苗天数达到 20 d 以上，最长的达 31 d；小麦拔节、孕穗、开花等生育期随播期推迟而向后推迟，T6 的拔节期推迟 12 d，成熟期差距有所缩小，相差 1~4 d (表 2)。同一播期下，不同播量对冬小麦生育期无影响。

表 2 不同播期和播量对冬小麦‘小偃 60’生育进程的影响

Table 2 Effects of different sowing dates and densities on the growing process of winter wheat ‘Xiaoyan 60’

播期 Sowing date	生育时期(月–日) Growing process (month-day)									
	播种期 Sowing date		出苗期 Emergence		拔节期 Jointing		开花期 Anthesis		成熟期 Maturity	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
T1	10-15	10-15	10-22	10-22	04-08	04-08	05-02	05-02	06-02	06-02
T2	10-21	10-21	10-31	10-31	04-09	04-09	05-03	05-03	06-03	06-03
T3	10-27	10-27	11-07	11-07	04-12	04-12	05-04	05-04	06-04	06-04
T4	11-02	11-02	11-24	11-24	04-14	04-14	05-04	05-04	06-04	06-04
T5	11-08	11-08	12-04	12-04	04-15	04-15	05-06	05-06	06-05	06-05
T6	11-14	11-14	12-15	12-15	04-20	04-20	05-08	05-08	06-06	06-06

T1, 10 月 15 日播种; T2, 10 月 21 日播种; T3, 10 月 27 日播种; T4, 11 月 2 日播种; T5, 11 月 8 日播种; T6, 11 月 14 日播种。B1：播量为 300 kg·hm^{-2}，T1 到 T6 播量相同; B2：随播期推迟播量逐期增加，每推迟 1 d 增加 7.5 kg·hm^{-2}，各播期的播量分别为 300 kg·hm^{-2} (T1)、345 kg·hm^{-2} (T2)、390 kg·hm^{-2} (T3)、435 kg·hm^{-2} (T4)、480 kg·hm^{-2} (T5)和 525 kg·hm^{-2} (T6)。下同。T1: sowing date was October 15th; T2: sowing date was October 21st; T3: sowing date was October 27th; T4: sowing date was November 2nd; T5: sowing date was November 8th; T6: sowing date was November 14th. B1: sowing density was 300 kg·hm^{-2} for all sowing dates (T1–T6); B2: sowing density was increased by 7.5 kg·hm^{-2}·day^{-1} for later sowing dates. The sowing density of each sowing date was 300 kg·hm^{-2} (T1), 345 kg·hm^{-2} (T2), 390 kg·hm^{-2} (T3), 435 kg·hm^{-2} (T4), 480 kg·hm^{-2} (T5) and 525 kg·hm^{-2} (T6). The same below.

2.2 播期播量对小麦群体数量的影响

由表 3 得出，随着播期推迟，冬小麦‘小偃 60’基本苗、出苗率、穗数、单株成穗数各项指标均不断降低。同一播期下，播量增加使基本苗、穗数大幅度提高，但出苗率、单株成穗数并未发生明显变化。B1 处理下，与 T1 相比，其他处理的基本苗减少 2.4%~23.2%、出苗率降低 2.3%~18.9%、穗数减少 14.6%~56.6%、单株成穗数减少 0.17~0.60 个。B2 条件下，与 T1 相比，其他播期的出苗率和单株成穗数变化幅度与 B1 条件下基本相同。

表 3 播期和播量对小麦‘小偃 60’基本苗、出苗率及成穗数的影响

Table 3 Effects of different sowing dates and densities on basic seedlings, emergence rate and spike number of winter wheat ‘Xiaoyan 60’

播期 Sowing date	基本苗 Basic seedlings (×10^4·hm^{-2})		出苗率 Emergence rate (%)		成熟期穗数 Spikes at maturity (×10^4·hm^{-2})		单株成穗数 Spikes per plant	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
T1	545.56±11.71a	545.56±11.71d	78.20±1.68a	78.20±1.68a	760.83±42.28a	760.83±42.28a	1.39±0.06a	1.39±0.06a
T2	532.73±5.89a	623.33±18.56cd	76.36±0.85a	77.69±2.31a	650.11±57.16b	780.83±68.66a	1.22±0.06b	1.25±0.08b
T3	489.72±38.40b	612.45±70.74cd	70.19±5.50b	67.53±6.81b	594.25±36.81b	761.67±47.18a	1.21±0.09b	1.24±0.05b
T4	461.17±10.94bc	685.56±28.35bc	66.10±1.57bc	67.77±2.80b	503.09±34.70c	706.67±41.63ab	1.09±0.09c	1.03±0.04c
T5	455.72±12.79c	744.04±18.01ab	65.32±1.83bc	66.65±3.24b	437.66±46.78c	702.22±21.43ab	0.96±0.03d	0.94±0.05c
T6	418.97±13.29d	798.32±17.17a	63.39±3.90c	65.39±3.47b	330.17±31.08d	637.78±60.03b	0.79±0.18e	0.80±0.05d

不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。Different letters mean significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

本试验中 B2 处理播量的增加是根据当地生产经验确定的(每推迟播种 1 d，增加播量 7.50 kg·hm^{-2})。从表 3 的数据可以发现，增加播量的 T4、T5、T6 播期的穗数低于 T1 播期 7.1%~16.2%，T6 显著下降，显然，此小麦品种晚播条件下，欲获得与适时播种相同的群体(穗数)，从经验得到的播量增加量是偏低的。

根据播量增加试验所得穗数及产量数据，得出穗数与产量关系符合二次多项式 y=–0.147x^2+226.8x–80 471 (R^2=0.965)(图 1)，由此关系式得出高产的适

宜穗数为 $770.66\times10^4\cdot hm^{-2}$。根据其他播期出苗率与单株成穗数的变化，计算出达到适宜穗数的各播期理论播量(图 2)，建立了理论播量与播期推迟天数的相关方程为 $y=0.368\ 2x^2+1.193\ 9x+316.7(R^2=0.983\ 9)$，即播期越晚，播量增加的幅度越大。

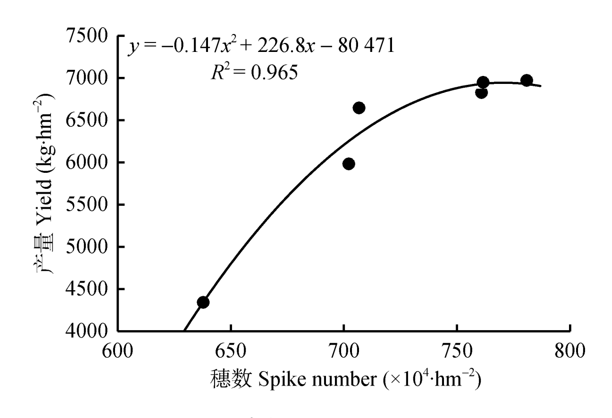


图 1　‘小偃 60’成熟期穗数与产量相关关系
Fig. 1　Relationship between yield and spikes number at maturity of winter wheat ‘Xiaoyan 60’

2.3　播期播量对小麦株高和生物量的影响

随着播期推迟，冬小麦株高显著降低(图 3A)。在 B1 处理下，与 T1 相比，其他播期植株高度下降 3.4~9.9 cm；在 B2 处理下，与 T1 相比，其他播期株高下降 4.3~11.2 cm。同一播期下，播量增加对株高未产生显著影响。

随播期推迟，冬小麦群体生物量表现下降趋势，在 B1 处理下，从 T3 开始群体生物量显著下降；在 B2 处理下，在 11 月 8 日(T5)以前播种的处理之间植株生物量没有显著差异。与 T1 相比，T6 播期在 B1、B2 处理下分别下降 50.2%、29.0%。同一播期下，增加播量可以显著提高群体生物量，在 T3、T4、T5、T6 处理下播量增加分别使生物量提高 17.6%、32.4%、40.6%、42.4%(图 3B)。

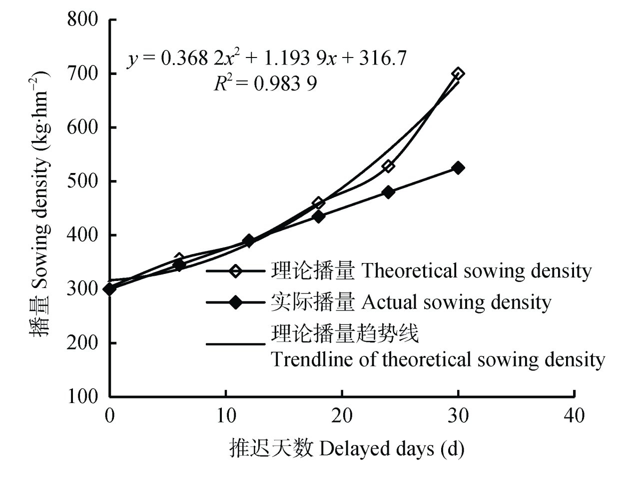


图 2　‘小偃 60’不同播期推迟下的理论播量与播量增加后的实际播量关系
Fig. 2　Relationship between theoretical sowing density of delayed sowing date and actual sowing density of winter wheat ‘Xiaoyan 60’

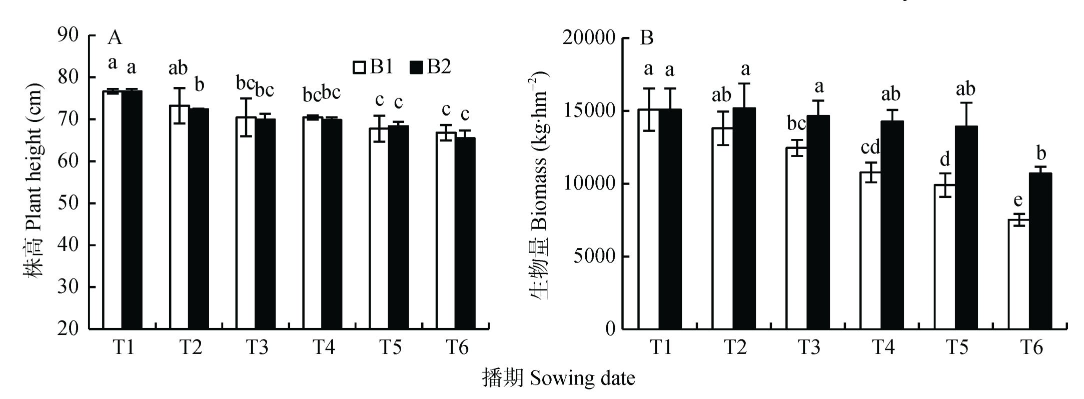


图 3　不同播期和播量对冬小麦‘小偃 60’大田株高(A)和生物量(B)的影响
Fig. 3　Effects of different sowing dates and densities on plant height (A) and biomass (B) of winter wheat ‘Xiaoyan 60’

2.4　播期播量对小麦产量及其构成的影响

由表 4 可以看出，随着播期的推迟，冬小麦‘小偃 60’单位面积穗数呈减少趋势，特别在播量不增加(B1)的前提下穗数减少明显。随播期推迟穗粒数有减少的趋势但变化不明显，与 T1 相比，仅 T6 播期的穗粒数显著减少。各处理间千粒重未出现显著性差异。T1~T4 4 个播期的收获指数(HI)差异不显著，最后两个播期逐渐降低至显著水平。

随播期推迟，小麦产量呈下降趋势，在 B1 条件下的产量显著降低，在 B2 条件下前 4 个播期的籽粒产量之间没有显著差异，后两个播期产量则显著降低；同一播期下播量增加，产量则显著提高。从产量变化和构成产量的三要素分析可以得出，籽粒产量与穗数呈极显著正相关，与穗粒数显著正相关(表 5)。晚播下的籽粒产量降低主要由穗数和穗粒数减少引起。

2.5　播期对水分利用的影响

表 6 表明，随播期推迟冬小麦‘小偃 60’各个播

表 4 播期和播量对冬小麦'小偃 60'产量及其产量构成的影响

Table 4 Yield and its components of winter wheat under different sowing dates and densities of winter wheat 'Xiaoyan 60'

播期 Sowing date	穗数 Spike number ($\times10^4\cdot hm^{-2}$)		穗粒数 Grain number per spike		千粒重 1000-grain weight (g)		产量 Yield ($kg\cdot hm^{-2}$)		收获指数 Harvest index	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
T1	760.83±42.28a	760.83±42.28a	21.76±2.36a	21.76±2.36a	41.52±2.45a	41.52±2.45a	6 830.02±302.36a	6 830.02±302.36a	0.45±0.03a	0.45±0.03ab
T2	650.11±57.16b	780.83±68.66a	22.42±0.61a	21.08±0.96a	43.15±1.23a	42.40±0.54a	6 283.60±208.47b	6 970.75±567.02a	0.46±0.04a	0.46±0.02ab
T3	594.25±36.81b	761.67±47.18a	22.41±1.05a	21.95±1.62a	42.17±0.38a	41.69±0.88a	5 610.08±200.80c	6 950.25±294.41a	0.45±0.01ab	0.48±0.02a
T4	503.09±34.70c	706.67±41.63ab	22.40±0.39a	21.88±2.61a	43.16±0.45a	43.01±0.52a	4 862.34±119.63d	6 648.42±372.04a	0.45±0.03ab	0.47±0.01a
T5	437.66±46.78c	702.22±21.43ab	21.84±0.48a	20.06±1.19a	41.88±0.28a	40.75±1.48a	4 001.61±11.91e	5 982.50±602.63b	0.41±0.04bc	0.43±0.02bc
T6	330.17±31.08d	637.78±60.03b	19.09±1.39b	16.91±1.01b	43.05±0.16a	40.46±0.53a	2 705.76±195.71f	4 345.11±99.33c	0.36±0.04c	0.41±0.01c

表 5 '小偃 60'产量与产量三要素的相关性分析

Table 5 Correlation among spike number, grain number per spike, 1000-grain weight and yield of winter wheat 'Xiaoyan 60'

	穗数 Spike number	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight	产量 Yield
穗数 Spike number	1.000			
穗粒数 Grain number per spike	−0.017	1.000		
千粒重 1000-grain weight	−0.242	0.039	1.000	
产量 Yield	0.900**	0.376*	−0.066	1.000

*表示显著相关(P<0.05); **表示极显著相关(P<0.01), 表 7 同。* mean significant correlation at 0.05 level; ** means significant correlation at 0.01 level. The same as the table 7.

表 6 不同播期和播量处理对冬小麦'小偃 60'耗水量及水分利用效率的影响

Table 6 Effects of different sowing dates and densities on water consumption and water use efficiency (WUE) of winter wheat 'Xiaoyan 60'

播期 Sowing date	总耗水量 Total water consumption (mm)		群体水分利用效率 Biomass water use efficiency ($kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$)		产量水分利用效率 Yield water use efficiency ($kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$)		叶片水分利用效率 Leaf water use efficiency ($\mu mol\cdot mmol^{-1}$)	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
T1	229.44±1.84a	229.44±1.83a	65.74±6.34a	65.74±6.34a	29.77±1.32ab	29.77±1.32a	5.17±0.11a	5.17±0.11a
T2	222.82±0.15ab	228.39±0.15a	63.03±3.90a	66.42±7.48a	28.74±1.12ab	30.52±2.48a	5.29±0.01a	5.19±0.13a
T3	218.05±18.36ab	228.95±19.28a	60.99±3.67ab	63.98±4.62a	27.48±1.40b	30.36±1.29a	5.14±0.25a	5.32±0.05a
T4	212.08±0.31ab	227.98±0.34a	55.58±3.43b	62.58±3.48a	25.10±1.13c	29.16±1.63ab	5.15±0.27a	5.36±0.06a
T5	201.90±7.11ab	222.09±7.82a	55.42±4.05b	62.66±7.38a	22.41±0.41d	26.94±2.71b	5.27±0.27a	5.38±0.02a
T6	191.81±28.18b	215.79±31.70a	44.69±1.87c	49.60±2.14b	16.11±1.29e	20.14±0.46c	5.07±0.02a	5.37±0.25a

期的耗水量有减少趋势, 但各处理间差异不显著(仅 B1T6 显著减少)。群体水分利用效率(WUE_{bm})和产量水分利用效率(WUE_y)随着播期推迟呈下降趋势, 在 B1 处理下前 3 个播期间的群体及产量水分利用效率没有显著差异, 后 3 个播期则显著降低, 在 B2 处理下 T6 群体水分利用效率显著下降, T5、T6 处理产量水分利用效率显著下降。与 T1 相比, B1T4、B1T5、B1T6、B2T5、B2T6 产量水分利用效率下降 9.5%~45.9%。叶片水分利用效率(WUE_{leaf})各处理间无显著变化。

2.6 水分利用效率与相关生理指标间的相关性分析

对冬小麦'小偃 60'水分利用效率、收获指数和产量的相关性分析表明(表 7), 籽粒产量与 WUE_{bm}、WUE_y、HI 呈极显著正相关。WUE_y 与 HI 呈极显著正相关。说明收获指数越高, WUE_y 越高, 在节水栽培中, 可以通过提高收获指数来提高小麦 WUE_y, 达到节水高产的目的。

3 讨论与结论

本研究表明, 播期播量对小麦的生育进程、群体性状和产量有重要影响。随着播期的推迟, 出苗日期由 7 d 推迟到 31 d, 小麦生育期推迟, 到成熟期差距有所缩小, 全生育期缩短, 这与其他人的研究结果一致[7–8,15–16]。播期对小麦田间出苗率和单株成穗数影响显著, 而播量处理对其影响不大, 晚播小麦出苗率和单株成穗数下降明显, 而在相同播期下, 播量增加, 基本苗和单位面积穗数增加。因此在生产上, 小麦错过适宜播期, 播量需要增加。小麦植株

表 7　'小偃 60'产量与水分利用效率和收获指数的相关性分析

Table 7　Correlation analysis of water use efficiency (WUE), harvest index (HI) and yield of winter wheat 'Xiaoyan 60'

	WUE_y	WUE_{bm}	WUE_{leaf}	HI	产量 Yield
WUE_y	1				
WUE_{bm}	0.900**	1			
WUE_{leaf}	−0.325	−0.235	1		
HI	0.690**	0.307	−0.306	1	
产量 Yield	0.998**	0.890**	−0.320	0.705**	1

WUE_y 为产量水分利用效率, WUE_{bm} 为群体水分利用效率, WUE_{leaf} 为叶片水分利用效率, HI 为收获指数。WUE_y is yield water use efficiency; WUE_{bm} is biomass water use efficiency; WUE_{leaf} is leaf water use efficiency; HI is harvest index.

高度是小麦形态构建的重要指标, 本试验结果表明, 随着播期推迟, 植株高度降低, 播量变化, 株高变化不明显。而小麦群体生物量随播期推迟呈下降趋势, 同一播期下, 增加播量可以显著提高群体生物量。这说明小麦个体生长主要受播期影响, 而群体生长受播期和基本苗共同影响, 这与何井瑞等[17]研究结果一致。

本研究表明随着播期的推迟, 单位面积穗数呈减少趋势, 特别在播量不增加的处理(B1)下, 穗数减少明显, 这与前人研究结果一致[15,18]。随播期推迟穗粒数有减少的趋势但变化不明显, 各处理间千粒重未出现显著性差异, 与陈素英等[19]研究结果一致。在 10 月 15 日至 11 月 14 日长达 1 个月的播期间, '小偃 60'的千粒重都在 40~44 g 范围内, 说明'小偃 60'是千粒重较高且稳定的品种。同一播期下, 播种密度增加, 单位面积穗数增加, 穗粒数及千粒重减小, 该结果与相关研究一致[6,15]。随播期推迟, 籽粒产量呈下降趋势, 籽粒产量最高出现在播期 10 月 21 日、播量 345 $kg\cdot hm^{-2}$ 处理, 其产量为 6 970.75 $kg\cdot hm^{-2}$。在本试验中, 在相同播量处理(B1)下, 产量下降显著, 减产幅度最高达 53.9%; 在逐期增加播量处理(B2)下, 前 4 个播期的籽粒产量差异不显著, T5、T6 播期显著降低, 沧州旱地农田土壤比较肥沃, 旱作冬小麦产量可达 4 500~5 250 $kg\cdot hm^{-2}$, 本试验在增加播量处理下, 至 11 月 8 日播种, '小偃 60'产量可达 5 982.50 $kg\cdot hm^{-2}$, 高于本地产量水平。这说明'小偃 60'适播期较长且耐旱性好, 但应根据生产条件选择适宜的播量搭配才能获得较高产量, 本研究计算出了达到试验区高产穗数的各播期理论播量, 建立了理论播量与播期推迟天数的相关方程为 y=0.368 $2x^2$+1.193 $9x$+316.7 (R^2=0.983 9), 通过此方程可得到一定播期范围内, 不同播期下的最佳播量。籽粒产量与 WUE_{bm}、WUE_y 呈极显著正相关, 与 WUE_{leaf} 无显著相关性。说明在本试验中, WUE_{leaf} 并不能反映'小偃 60'实际生产水平, WUE_{bm} 和 WUE_y 可以较好地体现最终平均产量。

通过分析讨论, 得出以下结论: 随播期推迟, '小偃 60'出苗率和单株成穗率显著下降, 播量对其无显著影响; 播量与播期推迟天数的理论关系为 y=0.368 $2x^2$+1.193 $9x$+316.7 (R^2=0.983 9), 即播期越晚, 播量增加的幅度越大; B2 密度处理下, 10 月 15 日至 11 月 2 日播种'小偃 60'产量无显著差异且高于本地产量水平, 说明'小偃 60'是一个播期宽泛的品种, 晚播条件下通过合理地增加播量, 可以实现高产和高 WUE_y 的双重目标。

参考文献 References

[1] Dong B D, Shi L, Shi C H, et al. Grain yield and water use efficiency of two types of winter wheat cultivars under different water regimes[J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 103–110

[2] 裴宏伟, 沈彦俊, 刘昌明. 华北平原典型农田氮素与水分循环[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 283–296
Pei H W, Shen Y J, Liu C M. Nitrogen and water cycling of typical cropland in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 283–296

[3] 高明秀, 李冉, 巩腾飞, 等. "渤海粮仓"建设推进策略分析[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(2): 245–251
Gao M X, Li R, Gong T F, et al. Analysis on the promoting strategy of the "Bohai Granary" construction[J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(2): 245–251

[4] 张敏, 王岩岩, 蔡瑞国, 等. 播期推迟对冬小麦产量形成和籽粒品质的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 325–330
Zhang M, Wang Y Y, Cai R G, et al. Regulating effect of delayed sowing date on yield formation and grain quality of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(2): 325–330

[5] 吴云龙, 李丽平, 刘胜尧, 等. 石家庄地区冬小麦适播期时空变化分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 768–774
Wu Y L, Li L P, Liu S Y, et al. Spatial and temporal variations in optimum sowing date of winter wheat in Shijiazhuang City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6): 768–774

[6] 李豪圣, 宋健民, 刘爱峰, 等. 播期和种植密度对超高产小麦'济麦 22'产量及其构成因素的影响[J]. 中国农学通报,

2011, 27(5): 243–248
Li H S, Song J M, Liu A F, et al. Effect of sowing time and planting density on yield and components of ‘Jimai22’ with super-high yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(5): 243–248

[7] 王夏，胡新，孙忠富，等. 不同播期和播量对小麦群体性状和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 170–176
Wang X, Hu X, Sun Z F, et al. Effect of different sowing dates and planting density on group characters and yield of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 170–176

[8] 李晓航，盛坤，杨丽娟. 播期播量对新麦 23 生育期、株高及产量性状的影响[J]. 山东农业科学, 2015, 47(5): 37–39
Li X H, Sheng K, Yang L J. Effects of sowing date and seeding rate on growth period, plant height and yield characters of Xinmai 23[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(5): 37–39

[9] 师学珍，郭君丽，杨相甫. 播种期和种植密度对豫麦 49 分蘖动态及产量的影响[J]. 贵州农业科学，2012，40(12): 55–57
Shi X Z, Guo J L, Yang X F. Effects of sowing date and planting density on tillering dynamics and yield of winter wheat cultivar Yumai 49[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(12): 55–57

[10] 于凯，王廷利，曲日涛，等. 冬小麦新品种‘烟农 5158’播期播量研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 53–57
Yu K, Wang T L, Qu R T, et al. Study on sowing date and seeding rate of new winter wheat variety ‘Yannong5158’[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 53–57

[11] 茆文军，商兆堂，吴建中，等. 小麦播期对穗粒结构的影响分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(12): 4913–4914
Mao W J, Shang Z T, Wu J Z, et al. Analysis on the relationship between seed-times and spike-grain structure[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(12): 4913–4914

[12] Sun H Y, Shao L W, Chen S Y, et al. Effects of sowing time and rate on crop growth and radiation use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. International Journal of Plant Production, 2013, 7(1): 117–138

[13] 植物细胞与染色体工程国家重点实验室. 植物细胞与染色体工程国家重点实验室 2011 年年报[R]. 北京：植物细胞与染色体工程国家重点实验室, 2011
State Key Laboratory of Plant Cell and Chromosome Engineering. Annual report of State Key Laboratory of Plant Cell and Chromosome Engineering in 2011[R]. Beijing: State Key Laboratory of Plant Cell and Chromosome Engineering, 2011

[14] 孙敏，温斐斐，高志强，等. 不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1459–1469
Sun M, Wen F F, Gao Z Q, et al. Effects of farming practice during fallow period on soil water storage and yield of dryland wheat in different rainfall years[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 1459–1469

[15] 何盛莲，吴政卿，雷振生，等. 播期、播量对小麦新品种郑麦 9962 产量及其构成因素的影响[J]. 河南农业科学, 2013, 42(9): 22–24
He S L, Wu Z Q, Lei Z S, et al. Effect of sowing date and planting density on yield and yield components of winter wheat Zhengmai 9962[J]. Journal of Henan Agricultural Science, 2013, 42(9): 22–24

[16] 张瑞芹，王新华，季爱民. 播期对小麦不同品种生育期及产量性状影响分析[J]. 大麦与谷类科学, 2011(4): 44–46
Zhang R Q, Wang X H, Ji A M. Influence of sowing dates on growth period and yield traits of different varieties of wheat[J]. Barley and Cereal Sciences, 2011(4): 44–46

[17] 何井瑞，陈之政，张洪树，等. 不同播期与基本苗对小麦生长发育及产量构成的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(33): 37–47
He J R, Chen Z Z, Zhang H S, et al. Effect of different sowing dates and basic seedlings on growth and yield formation of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(33): 37–47

[18] 孟丽梅，张珂，杨子光，等. 播期播量对冬小麦品种‘洛麦 22’产量形成及主要性状的影响[J]. 中国农学通报，2012, 28(18): 107–110
Meng L M, Zhang K, Yang Z G, et al. Effect of sowing date, seed rate on yield and main characters of ‘Luomai 22’ winter wheat varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(18): 107–110

[19] 陈素英，张喜英，毛任钊，等. 播期和播量对冬小麦冠层光合有效辐射和产量的影响[J]. 中国生态农业学报，2009, 17(4): 681–685
Chen S Y, Zhang X Y, Mao R Z, et al. Effect of sowing date and rate on canopy intercepted photo-synthetically active radiation and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(4): 681–685